

Н. С. СИУНОВ, Б. А. КУЗНЕЦОВ

ТОРМОЗНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИФТОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ОБМОТК СТАТОРА С РАЗНЫМ ЧИСЛОМ ПОЛЮСОВ

В электроприводе пассажирских лифтов с двухскоростными асинхронными двигателями по условиям комфортабельности требуется определенное ограничение пусковых и тормозных моментов. В частности, по существующим техническим условиям наи-

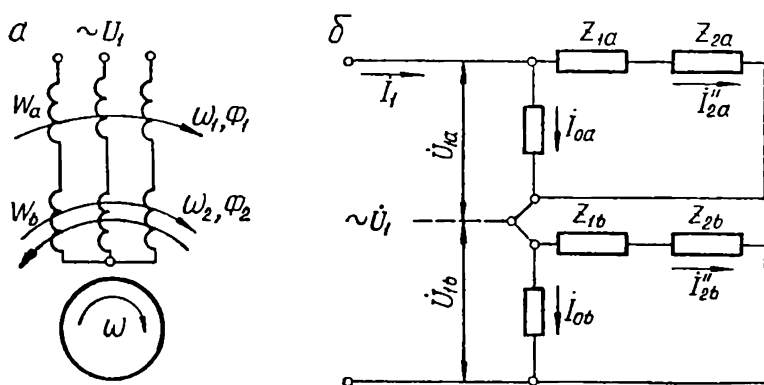


Рис. 1. Схема последовательного соединения обмоток двухскоростного двигателя (а) и эквивалентная схема замещения (б):

W_a — тихоходная обмотка; W_b — быстроходная обмотка.

большой тормозной момент тихоходной обмотки должен быть не более 130—135% от максимального момента быстроходной обмотки (в двигательном режиме). Выполнение этого требования значительно усложняет общую задачу по расчету и конструированию двухскоростных двигателей. Выбор параметров тихоходной обмотки из условий тормозного режима приводит в большинстве случаев к ухудшению пусковых характеристик, росту номинального скольжения и снижению к. п. д. при работе на низкой скорости. В связи с этим среди целого ряда методов ограничения тормозных моментов двигателя заслуживает внимания способ

последовательного соединения обмоток с разным числом полюсов (рис. 1, а).

В этой схеме возможны два варианта включения тихоходной и быстроходной обмоток двигателя: с согласным и встречным вращением полей в расточке статора (СВП, ВВП). Первый из этих вариантов (СВП) известен в литературе [1] и применяется при управлении двухскоростными крановыми двигателями. Второй вариант (ВВП) до настоящего времени не применялся. Как показали проведенные исследования, он позволяет получить характеристики, лучше удовлетворяющие требованиям грузоподъемных механизмов, в том числе и лифтов [2].

При выводе уравнений характеристик в схеме последовательного соединения целесообразно учесть ряд допущений и дополнительных условий:

1. Влиянием насыщения на параметры двигателя пренебрегаем, так как каждая из обмоток работает на пониженном напряжении.

2. Рассматриваем двигатель без вытеснения тока в клетке ротора.

3. Взаимоиндукцию обмоток с разным числом полюсов считаем равной нулю, так как в большинстве случаев это обеспечивается выбором схемы обмоток и обмоточных коэффициентов.

Учитывая эти допущения, магнитную и электрическую цепи двигателя можно рассматривать линейными, а в анализе применять принцип наложения магнитных полей и токов в клетке ротора.

Эквивалентная схема двигателя при последовательном соединении обмоток (рис. 1, б) описывается следующими уравнениями:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1a} + \dot{U}_{1b}; \quad (1)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_a + Z_b}; \quad (2)$$

$$\dot{U}_{1a} = \dot{I}_1 Z_a = \dot{U}_1 \frac{Z_a}{Z_a + Z_b}; \quad (3)$$

$$\dot{U}_{1b} = \dot{I}_1 Z_b = \dot{U}_1 \frac{Z_b}{Z_a + Z_b}; \quad (4)$$

$$Z_a = \frac{Z_{0a} (Z_{1a} + Z_{2a})}{Z_{0a} + Z_{1a} + Z_{2a}}; \quad (5)$$

$$Z_b = \frac{Z_{0b} (Z_{1b} + Z_{2b})}{Z_{0b} + Z_{1b} + Z_{2b}}. \quad (6)$$

Комплексные параметры в уравнениях (5) и (6) соответствуют общепринятой Г-образной схеме с выносом контура намагничивания на зажимы сети [3]. Опуская индексы обмоток a и b , эти комплексы можно раскрыть в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= r_1 + j(x_1 + x_m); \\ Z_1 &= c_1 r_1 + jc_1 x_1; \\ Z_2 &= c_1^2 \frac{r_2'}{s} + jc_1^2 x_2'; \\ c_1 &= \frac{x_1 + x_m}{x_m}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Токи вторичных контуров схемы замещения можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{2a}'' &= \frac{\dot{U}_{1a}}{Z_{1a} + Z_{2a}}; \\ \dot{I}_{2b}'' &= \frac{\dot{U}_{1b}}{Z_{1b} + Z_{2b}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

и далее перейти к уравнению электромагнитной мощности, развиваемой обмотками a и b :

$$\left. \begin{aligned} P_{\Sigma a} &= m_1 (\dot{I}_{2a}'')^2 c_{1a}^2 \frac{r_{2a}'}{s_a}; \\ P_{\Sigma b} &= m_1 (\dot{I}_{2b}'')^2 c_{1b}^2 \frac{r_{2b}'}{s_b}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Результирующий момент на валу

$$M_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma a}}{\omega_1} + \frac{P_{\Sigma b}}{\omega_2}. \quad (10)$$

Подставляя в (9) и (10) значение токов (8), получим запись

$$\begin{aligned} M_{\Sigma} &= \frac{m_1 U_1^2 c_{1a}^2 r_{2a}'}{\omega_1 s_a |Z_{1a} + Z_{2a}|^2} \cdot \frac{Z_a^2}{|Z_a + Z_b|^2} + \\ &+ \frac{m_1 U_1^2 c_{1b}^2 r_{2b}'}{\omega_2 s_b |Z_{1b} + Z_{2b}|^2} \cdot \frac{Z_b^2}{|Z_a + Z_b|^2} = M_a u_{1a}^2 + M_b u_{1b}^2, \end{aligned} \quad (11)$$

где M_a ; M_b — моменты, развиваемые обмотками a и b при полном напряжении U_1 и данной скорости ротора, соответствующие естественным характеристикам;

$u_{1a} = \frac{U_{1a}}{U_1}; u_{1b} = \frac{U_{1b}}{U_1}$ — относительные величины напряжения соответственно на обмотке a и b в последовательной схеме.

Как видно, результирующая характеристика (11) может быть получена на основе суммирования естественных характеристик с учетом коэффициентов распределения напряжения в схеме последовательного соединения. Точный расчет величины u_{1a} и u_{1b} требует операций с полным развертыванием комплексов Z_a и Z_b по схеме замещения с учетом взаимосвязи скольжений s_a и s_b . Последняя может быть выражена уравнением:

$$s_b = \left(1 \mp \frac{p_b}{p_a}\right) \pm \frac{p_b}{p_a} s_a, \quad (12)$$

где p_a, p_b — число пар полюсов соответственно обмотки a и b .

В уравнении (12) верхние знаки соответствуют схеме СВП, нижние — ВВП.

На рис. 2 представлены характеристики лифтового двигателя с числом полюсов $2p=6/24$, построенные по уравнению (11) для режимов СВП и ВВП. В режиме СВП (рис. 2, a) по результирующей характеристике получено уменьшение максимального тормозного момента тихоходной обмотки на 40%. Однако вблизи высшей синхронной скорости получается провал тормозных моментов в сторону положительных значений, обусловленный ростом сопротивления Z_b быстроходной обмотки и уменьшением напряжения U_{1a} на тихоходной обмотке. При малой статической нагрузке на валу этот провал не позволит перевести двигатель с высшей скорости на низшую, так как величина положительного момента достигает 50% от M_n двигателя.

В условиях эксплуатации лифтов такой режим вполне возможен ввиду полууравновешенного типа подвески кабины на трогах. Вследствие этого торможение и точный останов лифта становятся ненадежными, а применение схемы СВП недопустимо.

В схеме ВВП (рис. 2, b) провал моментов, вызываемый параметрами быстроходной обмотки, сместился в зону отрицательных скоростей вращения. В рабочей зоне, где быстроходная обмотка работает в режиме противовключения ($s_b > 1$), ее параметры остаются практически постоянными и дают равномерное уменьшение моментов тихоходной обмотки. По результирующей характеристике максимальный тормозной момент уменьшился на 32%. Форма результирующей характеристики в схеме ВВП вполне удовлетворяет требованиям грузоподъемных механизмов и лифтов.

Следует отметить, что в рассмотренном примере приведены характеристики опытного двигателя с неблагоприятным соотношением моментов, так как обе обмотки рассчитаны с одинаковой перегрузочной способностью в рабочем режиме. Вследствие этого

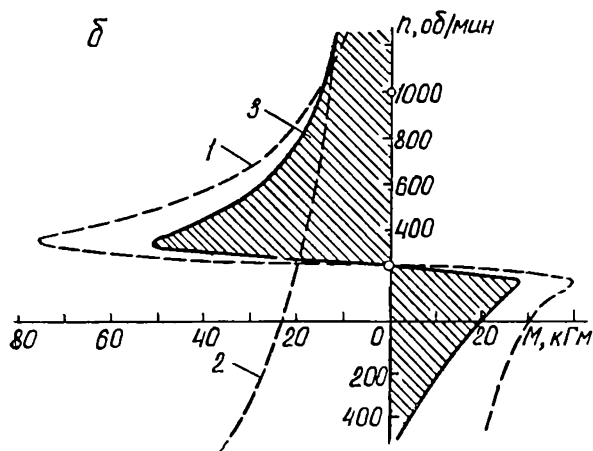
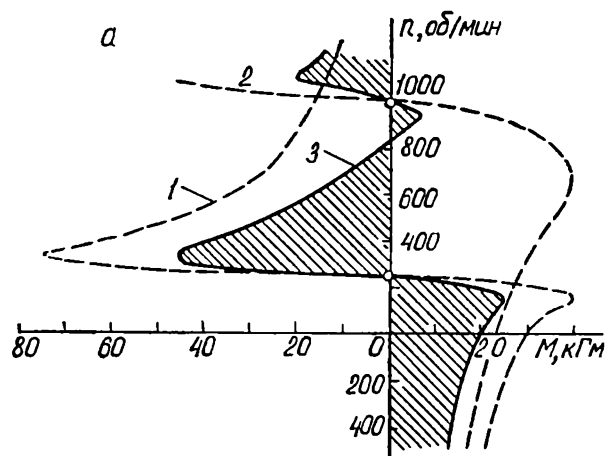


Рис. 2. Характеристики двигателя при последовательном соединении обмоток $2p=6/24$ по вариантам СВП (а) и ВВП (б):
 1 — характеристика обмотки $2p=24$; 2 — обмотки $2p=6$;
 3 — результирующая.

максимальный тормозной момент значительно превышал допустимые значения:

$$\frac{M_{г\max}(24)}{M_{д\max}(6)} = 1,90.$$

При последовательном соединении обмоток это отношение уменьшилось до величины 1,13 (СВП) и 1,30 (ВВП), что вполне допустимо по условиям лифтового привода.

При проектировании и эксплуатации двухскоростных двигателей может возникнуть необходимость в достаточно точном и нетрудоемком методе расчета результирующей характеристики в схеме ВВП. Расчет по уравнению (11) требует многочисленных операций с комплексами и по своей трудоемкости вполне оправдывает применение ЭЦВМ [4]. Возможно некоторое упрощение расчетов при пренебрежении токами намагничивания в схеме замещения ($I_{0a} = I_{0b} = 0$; $Z_{0a} = Z_{0b} = \infty$).

При таком допущении получается достаточно простое алгебраическое уравнение для расчета результирующего момента [5]

$$M_{\Sigma} = \frac{m_1 U^2}{\omega_1} \cdot \frac{\left(\frac{R_{2a}}{s_a} \pm \frac{R_{2b}}{vs_b} \right)}{\left(R_{1a} + R_{1b} + \frac{R_{2a}}{s_a} + \frac{R_{2b}}{s_b} \right)^2 + X_k^2} \quad (\text{СВП/ВВП}), \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} R_{1a} &= c_{1a} r_{1a}; \quad R_{2a} = c_{1a}' r_{2a}; \\ R_{1b} &= c_{1b} r_{1b}; \quad R_{2b} = c_{1b}' r_{2b}; \\ X_k &= c_{1a} x_{1a} + c_{1a}' x_{2a} + c_{1b} x_b + c_{1b}' x_{2b}; \\ v &= \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{p_a}{p_b}. \end{aligned}$$

Однако для лифтовых двигателей это уравнение дает значительную погрешность в зоне максимальных моментов (25%). Это объясняется тем, что сопротивление намагничивания тихоходной обмотки Z_{0a} соизмеримо с сопротивлением рабочего контура ($Z_{1a} + Z_{2a}$) и пренебрежение им изменяет распределение напряжения между обмотками.

Учитывая, что быстроходная обмотка в схеме ВВП работает в режиме противовключения, ее можно заменить постоянным комплексным сопротивлением, подключенным к зажимам тихоходной обмотки. Достаточная точность расчетов получается, если принять $S_b = 1$. При этом

$$Z_b = Z_{1b} + Z_{2b} = R_{kb} + jX_{kb},$$

где

$$R_{kb} = c_{1b} r_{1b} + c_{1b}^2 r'_{2b};$$

$$X_{kb} = c_{1b} x_{1b} + c_{1b}^2 x'_{2b}.$$

Эквивалентная схема последовательного соединения обмоток приводится к виду, который позволяет вести расчет результирующей характеристики на основе уравнений обычной асинхронной машины. Для этого контур намагничивания выносится на зажимы сети за сопротивление Z_b (рис. 3).

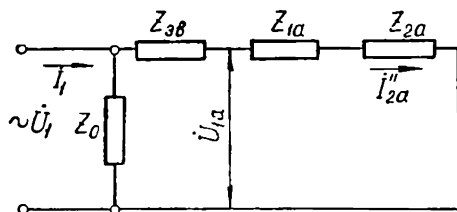


Рис. 3. Эквивалентная схема при замене быстроходной обмотки постоянным сопротивлением.

Параметры этой схемы описываются следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} Z_0' &= Z_b + Z_{0a} = (r_{1a} + R_{kb}) + j(x_{1a} + x_{ma} + X_{kb}); \\ Z_{\Sigma b} &= c_1 R_{kb} + j c_1 X_{kb} = R_{\Sigma b} + j X_{\Sigma b}; \\ Z_{1a} &= c_1 r_{1a} + j c_1 x_{1a} = R_{1a} + j X_{1a}; \\ Z_{2a} &= c_1^2 \frac{r'_{2a}}{s_a} + j c_1^2 x'_{2a} = \frac{R_{2a}}{s_a} + j X_{2a}, \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

где

$$c_1 = \frac{x_{1a} + x_{ma} + X_{kb}}{x_{ma}}.$$

При замене быстроходной обмотки постоянным сопротивлением мы пренебрегли моментом, создаваемым полем этой обмотки. Однако эта погрешность незначительна (3—5%) и может быть легко учтена. Из этой схемы легко вывести уравнение для расчета моментов тихоходной обмотки, записав его в виде известной формулы Клосса

$$M = M_k \frac{2(1+\epsilon)}{\frac{s_k}{s_a} + \frac{s_a}{s_k} + 2\epsilon}, \quad (15)$$

где

$$M_k = \frac{m_1 V_1^2}{2\omega_1} \cdot \frac{1}{[(R_{1a} + R_{\Sigma b}) \pm \sqrt{(R_{1a} + R_{\Sigma b})^2 + (X_{1a} + X_{2a} + X_{\Sigma b})^2}]};$$

$$s_k = \frac{R_{2a}}{\sqrt{(R_{1a} + R_{\text{эб}})^2 + (X_{1a} + X_{2a} + X_{\text{эб}})^2}};$$

$$\varepsilon = \frac{R_{1a} + R_{\text{эб}}}{\sqrt{(R_{1a} + R_{\text{эб}})^2 + (X_{1a} + X_{2a} + X_{\text{эб}})^2}}.$$

Расчет характеристики в схеме ВВП по уравнению (15) дает достаточно хорошее совпадение с опытом. Необходимые параметры легко получить из опытов холостого хода и короткого замыкания, проведенных отдельно для каждой из обмоток двигателя.

Уменьшение моментов в схеме ВВП зависит от соотношения скоростей и мощностей обмоток двухскоростного двигателя. Чем ближе значения параметров (по опыту короткого замыкания), тем сильнее уменьшаются моменты в схеме последовательного соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. М. Баталов, В. А. Белый и др. Краново-металлургические электродвигатели. М., «Энергия», 1967.
2. Б. А. Кузнецов, Н. С. Сиунов. Способ управления асинхронным двухобмоточным многоскоростным электродвигателем. Авт. свид. № 256058, «Бюллетень изобретений и открытий», 1969, № 34.
3. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины. Ч. II. М., ГЭИ, 1958.
4. С. П. Васильевский, Ю. С. Девинталь и др. Метод расчета на ЭЦВМ переходных процессов в каскадной системе пуска электропривода с короткозамкнутыми двигателями. Сб. «Специальные системы электропривода», вып. 2, ППИ, Пермь, 1967.
5. Э. Г. Манн. К вопросу расчета переходных процессов в жестко-связанных каскадных системах с короткозамкнутыми двигателями. Сб. «Специальные системы электропривода», вып. 2, ППИ, Пермь, 1967.